第 37 卷第 4 期
2017 年 2 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.4
Feb.,2017

DOI:10.5846/stxb201606211206
陈锦平,曾成城,魏虹,刘媛,王振夏,贾中民.不同水淹下狗牙根-牛鞭草混作对植株生物量的影响.生态学报,2017,37(4):1111-1118.
Chen J P, Zeng C C, Wei H, Liu Y, Wang Z X, Jia Z M.Effects of mixed intercropping of *Cynodon dactylon* and *Hemarthria altissima* on their biomass under different flooding conditions.Acta Ecologica Sinica,2017,37(4):1111-1118.

不同水淹下狗牙根-牛鞭草混作对植株生物量的影响

陈锦平[1,2],曾成城[1],魏　虹[1,*],刘　媛[1],王振夏[1],贾中民[1,3]

1 三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室,西南大学生命科学学院, 重庆　400715
2 广西农业科学院农业资源与环境研究所,南宁　530007
3 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆　400038

摘要:了解狗牙根(*Cynodon dactylon*)和牛鞭草(*Hemarthria altissima*)在不同水淹地区较优的种植方式对退化湿地的植被修复具有重要意义。设置 4 种不同水分条件,即对照组(CK)、水淹与干旱交替组(FD)、土壤表面水淹组(FL)和全淹组(SM),4 种不同的植株密度(每盆分别种植 1,2,4 株或 12 株)和 2 种不同的种植方式(单作和混作),研究两物种在不同水淹条件下以不同方式和密度种植时的生物量变化。结果表明,水分、种植密度和种植方式均显著影响两物种的地上生物量和总生物量($P<0.05$)。CK 和 FD 条件下,以中、高密度混作的狗牙根地上生物量和总生物量与单作相比显著下降($P<0.05$),牛鞭草在混作方式下的生物量与单作相比有了一定提高,其中在高密度混作情况下其生物量得到显著提高($P<0.05$)。在 FL 条件下,与单作相比,中、低密度混作的狗牙根和牛鞭草生物量均具有一定的上升。全淹条件下以中、低密度混作对狗牙根地上生物量和总生物量具有显著的促进作用($P<0.05$),对牛鞭草无显著差异($P>0.05$),高密度混作方式则对两物种生物量均无显著影响($P>0.05$)。随着水淹程度的增加,混作对狗牙根产生的生长抑制影响逐渐减弱。在长期浅水淹的地区,采取中、低密度混作将更有利于牛鞭草和狗牙根的长期共存。在较低海拔的全淹地区,采取高密度的牛鞭草-狗牙根混作方式将是更为理想的选择。

关键词:狗牙根;牛鞭草;水淹;混作

Effects of mixed intercropping of *Cynodon dactylon* and *Hemarthria altissima* on their biomass under different flooding conditions

CHEN Jinping[1,2], ZENG Chengcheng[1], WEI Hong[1,*], LIU Yuan[1], WANG Zhenxia[1], JIA Zhongmin[1,3]

1 *Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*
2 *Agricultural Resources and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning* 530007, *China*
3 *Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing* 400038, *China*

Abstract: The water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir has been affected by a number of ecological problems, most importantly, the loss of previous vegetation. The revegetation of this region is just one example of a potential solution to this issue, and revegetation projects have been carried out in the region over recent years in an attempt to restore the riparian ecosystem within the Three Gorges Reservoir region. The riparian species *Hemarthria altissima* and *Cynodon dactylon* have been commonly used in this revegetation effort. Knowledge of the growth responses of plant species to different flood regimes and identifying a suitable planting pattern will lead to improvements in the design of wetland management strategies. Therefore, the aim of this study was to determine the optimal planting pattern for these two species under different flood conditions. Four flooding conditions were designed using an independent-group design and their results were evaluated.

基金项目:国家国际科技合作专项(2015DFA90900);三峡后续工作库区生态与生物多样性保护专项项目(5000002013BB5200002);重庆市林业重点科技攻关项目(渝林科研 2015-6);中央财政林业科技推广示范项目(渝林科推[2014-10])

收稿日期:2016-06-21;　**修订日期:**2016-10-27

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: weihong@swu.edu.cn

These groups were the Control Group (CK), the Flooding-Dry Alternating Group (FD), the Soil-Flooding Group (FL), and the Submergence Group (SM). These groups had four different planting densities, which were 1, 2, 4, or 12 plants per experimental pot. Single cropping strategies were applied to the pot with one plant, while both single and mixed cropping strategies were applied to the pots with, 2, 4, and 12 plants. The ratio of *H. altissima* to *C. dactylon* in the mixed intercropping groups was 1:1 in the pots with 2, 4, and 12 plants. The results indicated that the total and aboveground biomasses of *H. altissima* and *C. dactylon* were significantly influenced by water treatment, planting density, and planting pattern ($P < 0.05$). The total and aboveground biomasses of *C. dactylon* significantly decreased in the mixed intercropping pots with medium and high planting densities under the CK and FD conditions ($P < 0.05$). In contrast, the total and aboveground biomasses of *H. altissima* increased in the mixed intercropping pots for all planting densities, and increased significantly at the high planting density under the CK and FD conditions ($P < 0.05$). The total *H. altissima* and *C. Dactylon* biomasses increased in the mixed intercropping pots with low and medium planting density under the FL treatment. The total and aboveground *C. dactylon* biomasses also significantly increased in the mixed intercropping pots with low and medium planting density under the SM treatment ($P < 0.05$). However, the mixed intercropping pattern with low and medium planting density did not influence the *H. altissima* biomass under the SM treatment ($P > 0.05$). Furthermore, the mixed intercropping pattern with high planting density did not influence the *H. altissima* and *C. Dactylon* biomasses under the SM treatment ($P > 0.05$). The inhibition influence of the mixed intercropping pattern to *C. Dactylon* declined as flooding stress increased. The results suggested that the long-term coexistence of *H. altissima* and *C. Dactylon* would improve if a mixed intercropping pattern with low and medium planting densities was adopted in areas where flooding lasted for a long period. Therefore, in order to strengthen the soil retention functions of *H. altissima* and *C. dactylon*, and improve the species diversity and community stability of the vegetation restoration, mixed intercropping with a high *H. altissima*-to-*C. dactylon* planting density is the optimal choice in low-altitude areas that are completely flooded.

Key Words: *Cynodon dactylon*; *Hemarthria altissima*; flooding; mixed intercropping

水淹是一种常见的非生物胁迫因子[1],浅淹、全淹和湿干交替变化的情况对三峡库区消落带的植物来说极为常见,这些水分逆境给消落带带来了严重的植被退化问题[2],进行人工植被修复是治理消落带环境问题的一项有效措施[3]。牛鞭草和狗牙根是两种常见的岸生植物,已有研究证明了这两种植物均具有较强的耐受水淹的能力[4-5],它们在消落带、海岸带、湿地、水库等退化生态环境中具有较大的应用潜力[6]。但以往的植被修复研究大多只局限在单一物种,而植被恢复中如果在草种单一的情况下,随着某些元素的大量消耗,土壤肥力减退,草地产草量维持年限将较短,草地稳定性也将较差[7]。由于不同物种对于资源富集的能力不同,对一些有益生物(寄生植物、菌类、微生物)的引入类别也各异,因此不同物种共存的情况下可以各自发挥自身优势,“互通有无”,“相互帮助”,最终可大大提高促进作用发生的可能性[8-9],也更有利于抵御病虫害[10],提高物种多样性[11],促进群落稳定[12]。越来越多的研究表明不同物种混作比单一物种更具优势[13]。因此,在草地的建设实践中草种的选择和混作组合及比例是决定人工草地成功与否,可利用时间长短的关键措施之一[14]。采取了良好的物种配置方式,既有利于构建良好的生态系统[15],也将可达到更好的土壤生态修复效果[16-17]。目前,草坪草混种早已成为草坪建植中的常用方法[18],为了提高周期性水淹地区植被恢复的成功率,有必要对不同草种混作情况下的生长情况开展研究,而植株生物量是植物生长代谢情况的综合反映,也是影响水土保持能力和植被覆盖效果的重要指标,因此可体现混作的优劣所在。

基于此,本研究通过模拟湿地常见的水淹环境,研究牛鞭草和狗牙根以不同植株密度等比例混作下生物量的变化,并与单作方式进行比较,了解在不同水淹情况下狗牙根-牛鞭草混作对这两物种生物量的影响,探究在不同水淹环境中哪种种植方式更有利于这两物种的生长,为库区等湿地的环境保护和植被修复实践提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料来源

本试验的研究对象为牛鞭草(*Hemarthria altissima*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*)当年生扦插苗。牛鞭草和狗牙根枝条在 2014 年 4 月 15 日从嘉陵江边北碚段挖回后分别剪成 16 cm 和 9 cm 的小段进行扦插,培养 10 d 即都长出新根新芽,生长良好,培养 25 d 后把长势均匀健壮的扦插苗移栽入规格为 22 cm×15 cm×17 cm(上径×下径×高)的花盆(上宽下窄,底部有凹进)。所有盆栽用苗均放置于生态试验园地(海拔 249 m)的遮雨棚下(棚顶透明,四面敞开)进行相同的光照和水分管理适应,适应 5 d 后进行实验处理,处理前所有植株长势良好,无病虫害,且处理前所有植株均只保留主茎。试验用土的基本理化性质见表 1。

表 1　土壤基本理化性质

Table 1　The basic physico-chemical characteristics of soils

pH 值 pH value	有机质 Organic matter/%	全氮 Total N / (g/kg)	全磷 Total P / (g/kg)	全钾 Total K / (g/kg)	碱解氮 Alkali hydrolyzable N /(mg/kg)	有效磷 Available P / (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)	田间持水量 Field capacity
7.18	2.52	1.41	1.01	17.82	132.82	31.72	129.54	33.6%

1.2　试验设计

将植株高度为 35 cm 左右的牛鞭草和株高为 32 cm 的狗牙根试验幼苗随机分组,以水分、种植密度和种植方式为考察因素,具体设计见表 2。试验过程中随机摆放花盆并定期交换位置,并根据植株生长情况保证各花盆间维持一定的距离,确保各花盆植株无相互干扰。其中 CK 为保持田间持水量 70%—80%(研究所用土壤田间持水量为 33.6%,采用环刀法测量[19])、FL 为土壤表面水淹 5 cm(将各花盆单独放入口径 35 cm,高 22 cm 的塑料盆后注水至土壤表面 5 cm 高度)、FD 为 10 d 土壤表面水淹 5 cm 和 10 d 轻度干旱交替变化(轻度干旱为保持田间持水量 50%—55%)、SM 为水面高出植株顶部 5 cm(将各处理花盆放入水淹实验专用水池,并在植株长高后相应地提高水池水位)。由于 FD 条件处理中 10 d 轻度干旱能在一定程度上缓解土壤表面水淹胁迫,因此各水分条件组水分胁迫强度由低到高排序为如下顺序 CK<FD<FL<SM。试验期间每天按时检查,及时补充消耗的水分,确保各处理组维持着设定的水分条件。

种植密度设置了 3 个水平,其中 2 株/盆为低密度组,4 株/盆为中密度组,高密度组为 12 株/盆。各密度组种植比例狗牙根:牛鞭草为 1:1,且种植时两种植株相间排列并保证分布均匀。处理 80 d 后进行取样测试,每个处理 3 个重复,样品以处理前的独立主茎形成的整体植株为单株。在试验中,同时设置了种植密度为 1 株/盆的牛鞭草和狗牙根单独个体组作为比对。

表 2　试验设计

Table 2　Experimental design

水分处理组 Water treatment groups	植株密度 Plant density					
	低密度(2 株/盆) Low density		中密度(4 株/盆) Medium density		高密度(12 株/盆) High density	
	单作 Sole cropping	混作 Mixed cropping	单作 Sole cropping	混作 Mixed cropping	单作 Sole cropping	混作 Mixed cropping
对照组 Control group (CK)	CK_2	MCK_2	CK_4	MCK_4	CK_{12}	MCK_{12}
水淹干旱交替组 Flooding-dry alternating group (FD)	FD_2	MFD_2	FD_4	MFD_4	FD_{12}	MFD_{12}
根部水淹组 Soil-flooding group (FL)	FL_2	MFL_2	FL_4	MFL_4	FL_{12}	MFL_{12}
全淹组 Submergence group (SM)	SM_2	MSM_2	SM_4	MSM_4	SM_{12}	MSM_{12}

CK_2下标"2"表示 2 株/盆,其他处理依此类推

1.3 生物量的测定

取样时,将每株植株的根和地上部分分开,随后立即放入 80℃烘箱中烘干至恒重,用电子天平称量各部分质量。单株总生物量=盆中所有植株总的生物量/盆中的株数。所有生物量均先求出组内所有单株质量再求平均值。

1.4 统计分析

利用 SPSS 20.0 软件采用三因素方差分析(Three factors variance analysis)来揭示不同水分、种植方式以及种植密度对根生物量、地上生物量和总生物量的影响。并运用 T 检验比较在相同水分和种植密度情况下单混作方式下各个指标的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同水淹下不同种植方式对狗牙根生物量的影响

所有处理组狗牙根存活率均为 100%。实验结果表明,水分和种植密度对狗牙根根生物量、地上生物量和总生物量均有极显著影响($P<0.01$),水分、种植密度和种植方式以及这三者的一级交互作用和二级交互作用对狗牙根地上生物量和总生物量均有显著影响($P<0.05$)(表 3)。

不同的水分条件和种植密度下,混作方式对狗牙根生长的影响不一。在 CK 和 FD 水分条件下,以低密度混作的狗牙根地上生物量和总生物量与单作方式下的值相比无显著差异($P>0.05$);中、高密度混作的狗牙根地上生物量和总生物量与单作相比显著下降($P<0.05$)(图 1)。FL 水分条件下,低、中密度混作的狗牙根地上生物量和总生物量均高于单作的值,但无显著差异($P>0.05$),但在高密度种植时单作的值则显著高于混作($P<0.05$)(图 1)。在全淹条件下,不管是混作还是单作,狗牙根的叶片均枯萎凋落,但其根茎都保持着存活,以中、低密度混作的狗牙根地上生物量和总生物量均显著高于单作方式下相应的值($P<0.05$),高密度种植情况下则无显著差异($P>0.05$)(图 1)。

表 3 水分、种植密度以及种植方式对狗牙根生物量的影响

Table 3 Effect of water treatment, planting density and planting pattern on the biomass of *C. dactylon*

处理 Treatments	根生物量 Root biomass	地上生物量 Over ground biomass	总生物量 Total biomass
水分 Water treatment	**	**	**
种植密度 Planting density	**	**	**
种植方式 Planting pattern	ns	*	*
水分×种植密度 Water treatment×Planting density	ns	*	*
水分×种植方式 Water treatment×Planting pattern	ns	**	**
密度×种植方式 Planting density×Planting pattern	ns	*	*
水分×种植密度×种植方式 Water treatment×Planting density× Planting pattern	*	*	*

*0.05 显著水平, ** 0.01 显著水平, ns 无显著差异

2.2 不同水淹下不同种植方式对牛鞭草生物量的影响

试验过程牛鞭草存活率为 100%。水分和种植密度对牛鞭草根生物量、地上生物量和总生物量均有极显著影响($P<0.01$),水分和种植密度的交互作用以及种植方式对地上生物量和总生物量具有显著影响($P<0.05$)(表 4)。种植方式和水分的交互作用,种植方式和密度的交互作用,以及水分、密度和种植方式的二级交互作用对牛鞭草根生物量、地上生物量和总生物量均无显著影响($P>0.05$)(表 4)。

非全淹条件下,中、低密度混作方式下牛鞭草的总生物量、地上生物量和根生物量与单作方式下的值无显著差异($P>0.05$)(图 2)。高密度种植情况下,湿干交替(FD)和地表水淹条件下(FL)混作的牛鞭草总生物量和地上生物量显著高于单作情况下的值($P<0.05$)(图 2)。全淹条件下,中、低密度种植情况下,混作方式的牛鞭草总生物量、地上生物量和根生物量均大于单作,但无显著差异($P>0.05$),同时高密度种植情况下混作

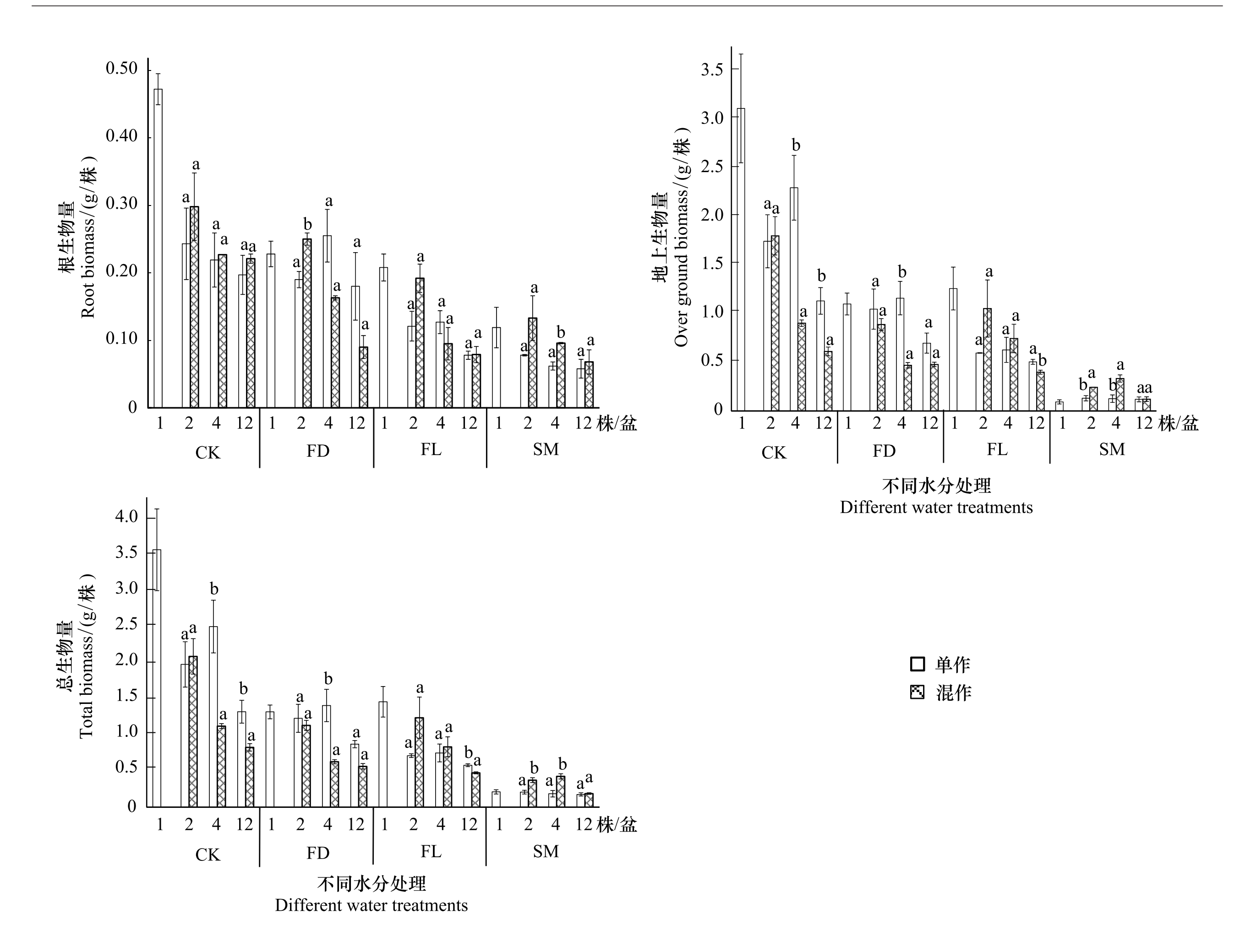


图 1　水淹、种植密度和种植方式对狗牙根生物量的影响

Fig.1　Effect of water treatment, planting density and planting pattern on the biomass of *C. dactylon*

表中数值为平均值±标准误。不同小写字母表示相同水分条件和种植密度下不同种植方式之间差异显著($P<0.05$)

方式的根生物量、地上生物量和总生物量与单作情况下的值相比无显著差异($P>0.05$)(图 2)。

表 4　水分、种植密度以及种植方式对牛鞭草生物量的影响

Table 4　Effect of water treatment, planting density and planting pattern on the biomass of *H. altissima*

处理	根生物量 Root biomass	地上生物量 Over ground biomass	总生物量 Total biomass
水分 Water treatment	**	**	**
种植密度 Planting density	**	**	**
种植方式 Planting pattern	ns	*	*
水分×种植密度 Water treatment×Planting density	ns	*	*
水分×种植方式 Water treatment×Planting pattern	ns	ns	ns
密度×种植方式 Planting density×Planting pattern	ns	ns	ns
水分×种植密度×种植方式 Water treatment×Planting density×Planting pattern	ns	ns	ns

在相同处理条件下,牛鞭草具有比狗牙根更高的生物量。水淹、种植密度和种植方式对牛鞭草和狗牙根的生长都具有重要影响,狗牙根生物量大体上随着水分胁迫程度的增加而逐渐下降,牛鞭草在非全淹条件下能保持较高生物量,但全淹条件下其生物量急剧下降。非全淹条件下,狗牙根和牛鞭草在两种种植方式下大体上都随着密度的增加而降低。在所有处理组中,混作方式下牛鞭草的根生物量、地上生物量和总生物量普

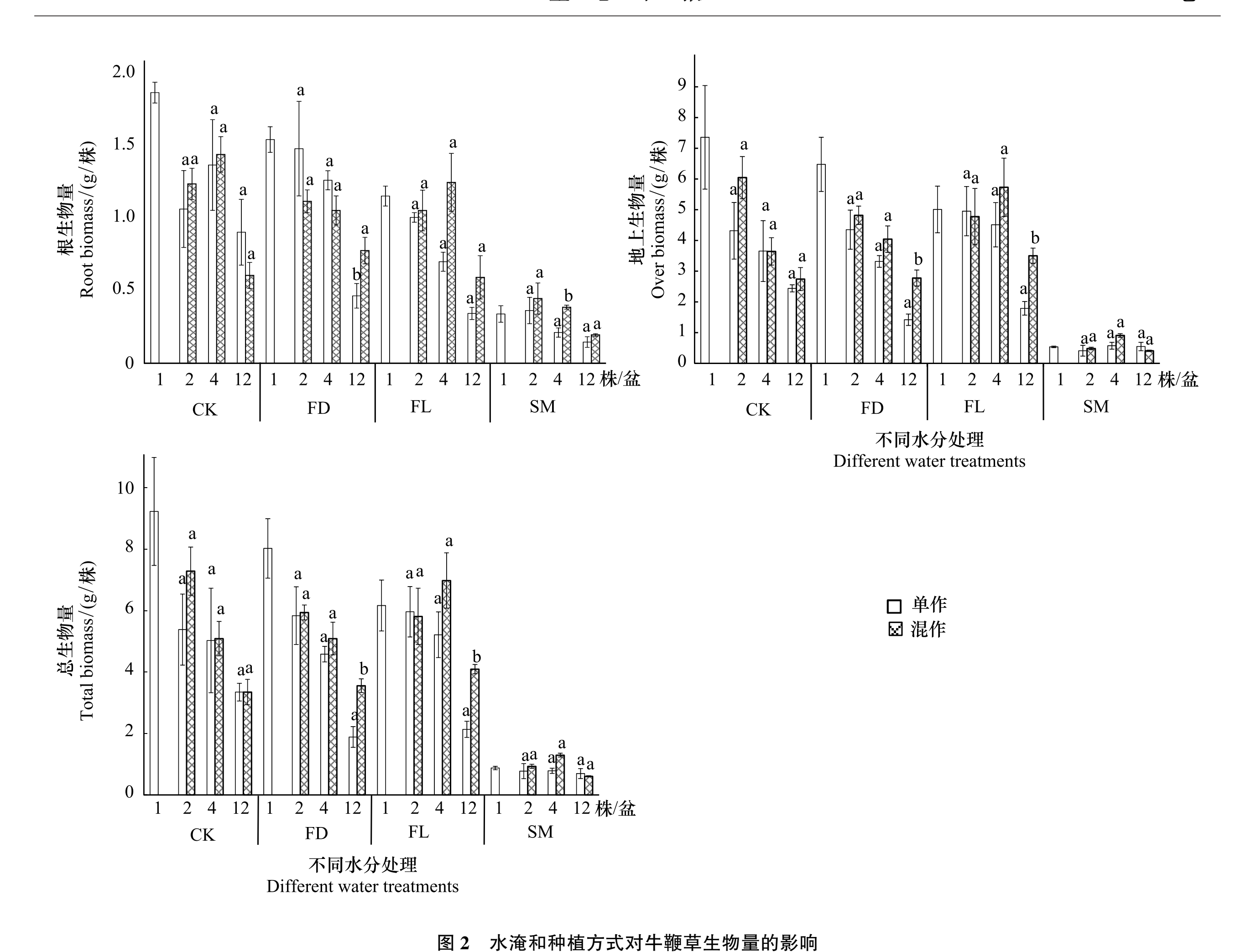


图 2 水淹和种植方式对牛鞭草生物量的影响

Fig.2 Effects of flooding and planting pattern on biomass of *H. altissima*

遍大于单作。而对于狗牙根来说,只有在地表水淹和全淹下混作才对狗牙根地上生物量和总生物量有利,在正常供水和湿干交替条件下,单作对狗牙根生长更有利。可见在水淹胁迫程度较低或者无水淹胁迫情况下,牛鞭草比狗牙根具有更大的竞争优势,而在高水淹胁迫环境下,混作对两者的生物量均出现了促进作用。

3 讨论与结论

与单作相比,混作一方面能明显改善植物根系的生理代谢,促进土壤微生物活动,使土壤微生物数量和多种酶活性处于较高水平[20-21]。另一方面,混作也能带来显著的增产效果[22],有利于植物营养的改善[23-24]和植物间相互作用关系的协调[25]。在混作过程中,种内及种间竞争是植物生长的主要限制因子之一,其中有些物种对种间的竞争是敏感的,若长期在竞争中处于不利的地位,就将面临被排除的危险,从而达不到混作的预期效果[26]。本研究结果表明,在正常供水条件下,与单作相比,混作的狗牙根总生物量和地上生物量在中、高密度种植情况下显著下降,而牛鞭草则在中密度混作方式下生物量没有显著差异,在高密度混作的种植方式下显著增加。由此可见,在非水淹条件下,在种间竞争中狗牙根生长受到了明显的抑制,混作对狗牙根不利。不适宜的物种组合混作有可能得到减产的结果,这与高阳等的研究结果相似[27]。

植物间的竞争关系复杂而敏感,竞争结果受到多种因素影响,如根瘤菌[28-29]、盐碱胁迫等[30]。水淹是一种常见的非生物胁迫因子[1],于国磊通过对空心莲子草的水淹研究发现,随着水淹水位的增加,植株间的竞争作用逐渐减弱,当水淹水位达到植株顶端以上 40 cm 时,空心莲子草植株间出现了促进作用,可见水淹胁迫也是影响竞争强度的一个重要因素[31]。同时,已有研究表明,植株间竞争强度的大小是物种特异的[32],且也

与环境条件紧密相关[33]。从本试验结果来看,湿干交替变化条件下混作的狗牙根受到种间竞争抑制作用仍然较大,但牛鞭草在各混作密度下的总生物量和地上生物量均有所提高,在高密度种植情况下显著提高。可见混作对这两物种的影响是有差异的,这可能与两物种应对水淹时的响应差异有关:牛鞭草应对非全淹胁迫时主要采取“逃避”策略以应对,可通过茎的伸长和叶面积的增大,促进茎、叶的生长以达到较高生物量[4],而狗牙根生长则随着水淹胁迫的加强而减弱[5]。牛鞭草植株较大的生物量在一定程度上会对狗牙根产生遮阴效应,因此在环境胁迫强度较弱、竞争强度较大的情况下,狗牙根的竞争能力要小于牛鞭草,这也在根部水淹条件下的高密度种植结果中得到体现。在持续的根部水淹条件下,与单作相比,中、低密度混作对狗牙根和牛鞭草的生物量都具有一定的促进作用,可见持续根部水淹对狗牙根在混作情况下的竞争劣势有了较大的改变,因此在此条件下利用中、低密度混作将更有利于两物种的长期共存。当水淹胁迫程度进一步加强,即在全淹条件下,与单作相比,高密度混作方式对两物种均无显著影响,中、低密度混作对狗牙根总生物量和地上生物量均具有显著提高,对牛鞭草也有一定促进作用。全淹明显改变了混作方式对狗牙根生长的不良影响。这一方面可能是由于全淹均显著抑制牛鞭草和狗牙根的生长,它们在全淹条件下都采取“静默策略”度过全淹期[34-35],两者在全淹条件下均生长缓慢,因此牛鞭草种间竞争力迅速减弱。另一方面可能是由于物种间相互作用关系的类型、强度随环境发生了方向上的逆转或强度上的变化[36]。研究发现,混作的物种间不仅存在着对光、热、水分和养分等资源的竞争关系,而且物种之间也有着明显的促进作用,尤其是在环境胁迫较高的情况下,物种间更加容易发生促进作用[36]。有学者发现与豆科植物混作的时候,混作往往比单作方式能收获更大的作物产量,这也与单作方式下种内竞争过于强烈有关[13,37]。研究表明,生物多样性与稳定性存在正相互关系[38],而当物种间存在一定强度的正相互作用时又可以显著增长两物种群落的共存时间,提高多物种群落的物种丰富度[39],从而有效地提高水土保持性能[40]。因此,综合考虑修复植物的存活率、生长能力、植被覆盖率和水土保持能力,在全淹条件下牛鞭草和狗牙根更适宜采用高密度混作模式。

综上所述,不同水淹条件下混作方式对牛鞭草和狗牙根生长的影响不同,因此需根据环境的水分条件状况采取不同的种植方式。在三峡库区较高海拔区域,即无水淹或湿干交替变化的地区,混作对狗牙根生物量具有一定的不利影响,因此不建议这两物种进行组合混作;在长期浅水淹的消落带区域,采取中、低密度混作将更有利于牛鞭草和狗牙根的长期共存;在较低海拔的全淹地区,综合考虑植被修复的整体效果,采用高密度的牛鞭草-狗牙根混作方式将是更为理想的选择。

参考文献(References):

[1] Colmer T D, Voesenek L. Flooding tolerance: suites of plant traits in variable environments. Functional Plant Biology, 2009, 36(8): 665-681.

[2] 张晔, 李昌晓. 水淹与干旱交替胁迫对湿地松幼苗光合与生长的影响. 林业科学, 2012, 47(12): 158-164.

[3] Ye C, Cheng X L, Zhang Y L, Wang Z X, Zhang Q F. Soil nitrogen dynamics following short-term revegetation in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. Ecological Engineering, 2012, 38(1): 37-44.

[4] 陈锦平, 王振夏, 曾成城, 李帅, 魏虹. 不同水分和植株密度处理对牛鞭草生长及形态的影响. 草业学报, 2015, 24(1): 39-46.

[5] 曾成城, 王振夏, 陈锦平, 顾艳文, 贾中民, 魏虹. 不同水分处理对狗牙根种内相互作用的影响. 生态学报, 2016, 36(3): 696-704.

[6] Yang C D, Zhang X, Zhou C Y, Seago J L Jr. Root and stem anatomy and histochemistry of four grasses from the Jianghan Floodplain along the Yangtze River, China. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2011, 206(7): 653-661.

[7] 宝音陶格涛, 陈敏, 关世英, 玉荣. 披碱草(*Elymusdahuricus*)与苜蓿(*Medicago*)混播试验研究. 内蒙古大学学报:自然科学版, 1997, 28(2): 222-228.

[8] Callaway R M. Positive interactions among plants. The Botanical Review, 1995, 61(4): 306-349.

[9] Babikova Z, Gilbert L, Bruce T J A, Birkett M, Caulfield J C, Woodcock C, Pickett J A, Johnson D. Underground signals carried through common mycelial networks warn neighbouring plants of aphid attack. Ecology Letters, 2013, 16(7): 835-843.

[10] 姜延涛, 许韬, 段霞瑜, 周益林. 品种混种控制小麦白粉病及其对小麦产量和蛋白质含量的影响. 作物学报, 2015, 41(2): 276-285.

[11] 唐以杰, 方展强, 何清, 吴映明, 陆棣, 李燕妮, 谭莉君, 杨学彬, 陈思敏. 无瓣海桑与乡土红树植物混交对林地大型底栖动物的影响. 生态学报,2015, 35(22): 7355-7366.

[12] 李钰洁. 山西矿区紫花苜蓿(单/混种)对干旱胁迫的生态适应性研究[D]. 太原: 山西大学, 2015.

[13] Neumann A, Schmidtke K, Rauber R. Effects of crop density and tillage system on grain yield and N uptake from soil and atmosphere of sole and intercropped pea and oat. Field Crops Research, 2007, 100(2-3): 285-293.
[14] 宝音陶格涛, 白永飞. 农牧交错区面临的问题及其解决的途径—以内蒙古多伦县为例. 应用生态学报, 2004, 15(2): 245-248.
[15] 左倬, 陈煜权, 成必新, 胡伟, 朱雪诞, 仓基俊, 王鹏. 不同植物配置下人工湿地大型底栖动物群落特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 2016, 36(4): 953-960.
[16] 刘胜洪, 周玲艳, 杨妙贤, 刘文, 梁红. 十种耐逆植物在和平县稀土矿区生态修复中的应用. 天津农业科学, 2013, 19(7): 92-96.
[17] 杨洋, 陈志鹏, 黎红亮, 廖柏寒, 曾清如. 两种农业种植模式对重金属土壤的修复潜力. 生态学报, 2016, 36(3): 688-695.
[18] 张磊, 郭月玲, 邵涛. 我国草坪草混播的研究现状及展望. 草原与草坪, 2008,(1): 81-86.
[19] 陈立新. 土壤实验实习教程. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2005:44.
[20] Niemi R M, Vepsäläinen M, Wallenius K, Simpanen S, Alakukku L, Pietola L. Temporal and soil depth-related variation in soil enzyme activities and in root growth of red clover (*Trifolium pratense*) and timothy (*Phleum pratense*) in the field. Applied Soil Ecology, 2005, 30(2):113-125.
[21] 马琨, 杨桂丽, 马玲, 汪春明, 魏常慧, 代晓华, 何文寿. 间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物群落的影响. 生态学报, 2016, 36(10): 2987-2995.
[22] 赵亚丽, 康杰, 刘天学, 李潮海. 不同基因型玉米间混作优势带型配置. 生态学报, 2013, 33(12): 3855-3864.
[23] 刘欣, 黄运湘, 袁红, 潘复静, 何寻阳, 张伟, 王克林. 植被类型与坡位对喀斯特土壤氮转化速率的影响. 生态学报, 2016, 36(9): 2578-2587.
[24] 高小宽. 黄瓜—花生混作系统中的铁营养效应及土壤酶活性研究. 蔬菜, 2014, (1): 25-27.
[25] Jolliffe P A, Wanjau F M. Competition and productivity in crop mixtures: some properties of productive intercrops. Journal of Agricultural Science, 1999, 132(4): 425-435.
[26] 周进, 陈中义, 陈家宽. 普通野生稻—长喙毛茛泽泻—柳叶箬混作种群的竞争效应. 生态学报, 2000, 20(4): 685-691.
[27] 高阳, 安雨, 王志锋, 任伟, 徐安凯. 柳枝稷与苜蓿混作生长特征及竞争作用研究. 北方园艺, 2016, (3): 61-65.
[28] 钟增涛, 沈其荣, 冉炜, 孙晓红, 谈健康, 茆泽圣. 旱作水稻与花生混作体系中接种根瘤菌对植株生长的促进作. 中国农业科学, 2002, 35(3): 303-308.
[29] 钟增涛, 沈其荣, 孙晓红, 冉炜, 茆泽圣. 根瘤菌在小麦与紫云英混作中的作用. 应用生态学报, 2003, 14(2): 187-190.
[30] 张玉勋, 周学东, 刘兆兴. 植株密度、种的比例和盐碱胁迫对羊草及碱茅种间竞争关系的效应. 生态学报, 1993, 13(4): 373-376.
[31] 于国磊. 水淹对克隆植物空心莲子草种内关系的影响. 植物生态学报, 2011, 35(9): 973-980.
[32] 储诚进. 植物间正相互作用对种群动态与群落结构的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
[33] Eskelinen A. Herbivore and neighbour effects on tundra plants depend on species identity, nutrient availability and local environmental conditions. Journal of Ecology, 2008, 96(1): 155-165.
[34] Luo F L, Nagel K A, Scharr H, Zeng B, Schurr U, Matsubara S. Recovery dynamics of growth, photosynthesis and carbohydrate accumulation after de-submergence: a comparison between two wetland plants showing escape and quiescence strategies. Annals of botany, 2011, 107(1): 49-63.
[35] Tan S D, Zhu M Y, Zhang Q F. Physiological responses of bermudagrass (*Cynodon dactylon*) to submergence. Acta physiologiae plantarum, 2010, 32(1): 133-140.
[36] Crain C M. Interactions between marsh plant species vary in direction and strength depending on environmental and consumer context. Journal of Ecology, 2008, 96(1): 166-173.
[37] 郑晓媛, 赵莉, 许楠, 张会慧, 孙广玉. 桑树大豆间作地上部和地下部的种间作用研究. 土壤, 2011, 43(3): 493-497.
[38] 张景慧, 黄永梅. 生物多样性与稳定性机制研究进展. 生态学报, 2016, 36(13): 3859-3870.
[39] Lin K, Zhang D Y, He F. Demographic tradeoffs in a neutral model explain deathrateabundancerank relationship. Ecology, 2009, 90(1): 31-38.
[40] 潘声旺, 袁馨, 雷志华, 胡明成. 乡土植物生活型构成对川渝地区边坡植被水土保持效益的影响. 生态学报, 2016, 36(15):4654-4663.